

## 认知无线电频谱切换目标信道访问机制

郑仕链\* 杨小牛

(西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071)

(通信信息控制和安全技术重点实验室 嘉兴 314033)

**摘要:** 针对认知无线电先应式决策频谱切换, 该文提出按照信道平均空闲时间递减的顺序对目标信道进行访问的机制, 证明了该机制在主用户信道空闲时间服从均匀分布、Rayleigh 分布以及 Weibull 分布下均能够保证频谱切换失败概率最小。仿真结果表明所提机制得到的频谱切换失败概率要远远小于随机访问机制的切换失败概率。另外, 当能够获得数十次信道空闲时间观测样本情况下, 虽然存在估计误差, 但所得频谱切换失败概率与理想最优频谱切换失败概率非常接近。

**关键词:** 认知无线电; 频谱切换; 信道访问

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2213-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00309

## Target Channel Visiting Scheme for Spectrum Handoff in Cognitive Radio

Zheng Shi-lian Yang Xiao-niu

(School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory, Jiaxing 314033, China)

**Abstract:** A target channel visiting scheme which visits target channels in a descending order of channel mean vacant time duration is proposed for proactive decision spectrum handoff in cognitive radio. It proofs that this scheme result in minimum probability of handoff failure when the channel vacant time duration follows uniform distribution, Rayleigh distribution or Weibull distribution. Simulations show that the probability of handoff failure of this scheme is far lower than that of the random target channel visiting scheme. Moreover, when tens of samples of channel vacant time duration can be obtained, even though there is estimation error, the probability of handoff failure of the proposed scheme is very close to the optimal minimum probability.

**Key words:** Cognitive Radio (CR); Spectrum handoff; Channel visiting

### 1 引言

无线频谱本身是一种稀缺的资源, 然而, 目前采用的静态频谱分配政策导致各个频段之间的频谱使用率不平衡, 且平均频谱使用率低下。为提高频谱利用率, 人们提出采用认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术<sup>[1]</sup>实现动态频谱接入, 允许次用户(即认知无线电用户)使用主用户当前没有使用的频谱空穴。当主用户再次使用频谱时, 认知无线电需要退出当前工作信道, 在其他频谱空穴上建立链路继续通信, 该过程即为频谱切换(spectrum handoff)<sup>[2]</sup>。

根据不同的准则, 可以对频谱切换进行不同的分类。根据 CR 何时进行频谱切换, 可以将频谱切换分为先应式频谱切换和反应式频谱切换<sup>[3]</sup>。先应式频谱切换中, CR 对主用户的行为进行预测, 在预

测到主用户即将出现而还没出现时就开始进行频谱切换<sup>[4]</sup>。反应式频谱切换中, 只有当检测到主用户出现后才启动频谱切换。另外, 根据 CR 进行频谱切换时选择目标信道的时刻, 可以将频谱切换分为先应式决策频谱切换和反应式决策频谱切换<sup>[5]</sup>。先应式决策频谱切换中, 目标信道在频谱切换之前就已准备好<sup>[6]</sup>, 而在反应式决策频谱切换中, 目标信道根据即时频谱感知结果得到<sup>[7]</sup>。针对先应式决策频谱切换, 文献[6]提出一种目标信道序列选择机制, 使得频谱切换总的耗费时间最短。而文献[8]中则提出一种目标信道序列选择机制, 使得频谱切换失败概率最小。然而, 文献[8]仅考虑了主用户信道空闲时间间隔服从指数分布的情况。本文则进一步考虑均匀分布、Rayleigh 分布以及 Weibull 分布, 证明按照信道平均空闲时间递减的顺序对目标信道进行访问能够得到最小频谱切换失败概率。另外, 已有研究成果均没有考虑对信道参数估计存在误差情况下的性能。本文则对该问题进行了研究。仿真表明在能够获得数十次(如 20 次)信道空闲时间样本的情况

2012-03-23 收到, 2012-06-05 改回

通信信息控制和安全技术重点实验室基金资助课题

\*通信作者: 郑仕链 lianshizheng@126.com

下,按照本文所提的目标信道访问机制对目标信道进行访问所得的切换失败概率与理想最优解非常接近。

### 2 频谱切换模型

本文考虑认知无线网络中相互通信的一对认知无线电。当在认知无线电当前通信信道中出现主用户或当前通信信道质量恶化时,认知无线电需要启动频谱切换流程,在其他空闲频谱上继续通信。本文考虑的频谱切换是先应式决策频谱切换,即供频谱切换流程尝试的目标信道在频谱切换启动前就已准备好。设认知无线电感知的信道共有  $N$  个,标号为  $\{i\}_{i=1}^N$ 。由于认知无线电双方所处环境不同,频谱空穴信息可能不同,因此认知无线电双方在通信过程中对各自感知到的频谱空穴信息进行交互,由此可以得到双方共同的频谱空穴信息,这些双方均空闲的信道即为认知无线电频谱切换时待尝试的信道。设共同的空闲信道(除了当前通信信道外)为  $\{c_i \in \{1,2,\dots,N\}\}_{i=1}^M$ ,其中  $M \leq N-1$ 。认知无线电频谱切换时,按特定的顺序逐个尝试目标信道,如图1所示,其中  $T$  为两次握手之间的时间间隔,  $T_h$  为一次握手所需的时间。如果在某个信道上握手成功,则频谱切换成功完成,如果握手不成功,则继续尝试下一个信道,直到成功或者直到尝试完所有信道为止。如果认知无线电尝试完所有目标信道,握手均未成功,则频谱切换失败。本文对目标信道访问顺序的设计原则是使得频谱切换失败的概率最小化。设目标信道访问序列为  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$ , 其是  $\{c_i\}_{i=1}^M$  的某种排列,则频谱切换目标信道访问问题变为以下优化问题

$$\mathbf{v}^* = \min_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} P_{\text{fail}} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{v}^*$  为最佳信道访问序列,  $\mathbf{V}$  为所有可能的信道

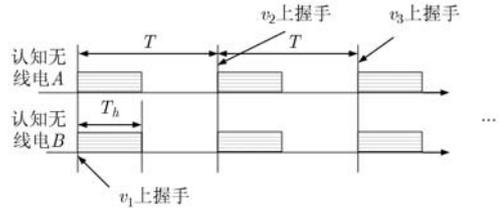


图1 频谱切换示意图

访问序列构成的集合,  $P_{\text{fail}}$  为给定某种信道访问序列时频谱切换失败概率。

### 3 目标信道访问机制

#### 3.1 信道空闲时间分布模型

文献[8]针对的是主用户到达过程服从Poisson过程时的最佳目标信道访问机制,此时主用户信道空闲时间服从指数分布。但是,正如文献[9]中所指出的,信道空闲时间可能服从其他分布。本文将信道空闲时间服从指数分布的研究扩展到其他分布模型,即均匀分布、Rayleigh分布和Weibull分布,其概率密度函数和数学期望如表1中所示。表中  $b_{c_i}$ ,  $\sigma_{c_i}$ ,  $\lambda_{c_i}$  等表示信道  $c_i$  对应的参数,  $\Gamma(a) = \int_0^\infty e^{-t} t^{a-1} dt$  ( $a > 0$ )。为便于比较,在表中还给出了指数分布的情况。

给定  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$ , 接下来看各种分布下的频谱切换失败概率表达式。虽然在频谱切换之前,  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$  是认知无线电通信双方均认为空闲的信道,但是由于主用户行为的变化,在频谱切换过程中,信道可能被主用户占用。显然,如果当认知无线电尝试在信道  $v_i$  上握手时  $v_i$  被主用户占用,此次握手失败。本文假设认知无线电频谱切换过程中,主用户信道状态不发生两次或两次以上的变化。在均匀分布情况下,信道  $v_i$  上握手失败的概

表1 各种分布数学期望、方差及对应的频谱切换失败概率

分布	概率密度函数	数学期望	方差	$\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$ 对应的 $P_{\text{fail}}$
$(0, b_{c_i})$ 上均匀分布	$f(x) = \begin{cases} 1/b_{c_i}, & 0 < x < 1/b_{c_i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$	$b_{c_i} / 2$	$b_{c_i}^2 / 12$	$\prod_{i=1}^M \min \left\{ \frac{(i-1)T + T_h}{b_{v_i}}, 1 \right\}$
Rayleigh 分布 ( $\sigma_{c_i} > 0$ )	$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_{c_i}^2} e^{-x^2/2\sigma_{c_i}^2}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$	$\sqrt{\pi/2} \sigma_{c_i}$	$\frac{4-\pi}{2} \sigma_{c_i}^2$	$\prod_{i=1}^M \left( 1 - \exp \left( -\frac{((i-1)T + T_h)^2}{2\sigma_{v_i}^2} \right) \right)$
Weibull 分布 ( $\lambda_{c_i} > 0, \alpha > 0$ )	$f(x) = \begin{cases} \alpha \lambda_{c_i} x^{\alpha-1} e^{-\lambda_{c_i} x^\alpha}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$	$\Gamma \left( \frac{1}{\alpha} + 1 \right) \lambda_{c_i}^{-1/\alpha}$	$\lambda_{c_i}^{-2/\alpha} \left( \Gamma \left( \frac{2}{\alpha} + 1 \right) - \left( \Gamma \left( \frac{1}{\alpha} + 1 \right) \right)^2 \right)$	$\prod_{i=1}^M \left( 1 - \exp \left( -\lambda_{v_i} ((i-1)T + T_h)^\alpha \right) \right)$
指数分布 ( $\lambda_{c_i} > 0$ )	$f(x) = \begin{cases} \lambda_{c_i} e^{-\lambda_{c_i} x}, & x > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$	$\lambda_{c_i}^{-1}$	$\lambda_{c_i}^{-2}$	$\prod_{i=1}^M \left( 1 - \exp \left( -\lambda_{v_i} ((i-1)T + T_h) \right) \right)$

率即为本次握手之前或本次握手过程中，信道  $v_i$  状态由空闲转为被占用的概率，即

$$P_{v_i} = \begin{cases} \int_0^{(i-1)T+T_h} \frac{1}{b_{v_i}} dx = \frac{(i-1)T+T_h}{b_{v_i}}, & (i-1)T+T_h < b_{v_i} \\ 1, & (i-1)T+T_h \geq b_{v_i} \end{cases} \quad (2)$$

将其进行简化，可将  $P_{v_i}$  写成  $P_{v_i} = \min \left\{ \frac{(i-1)T+T_h}{b_{v_i}}, 1 \right\}$ 。因此，频谱切换失败概率为

$$P_{\text{fail}} = \prod_{i=1}^M P_{v_i} = \prod_{i=1}^M \min \left\{ \frac{(i-1)T+T_h}{b_{v_i}}, 1 \right\} \quad (3)$$

同理可得其他分布模型下的频谱切换失败概率，如表1中所示。目标信道访问问题即为找到最佳的访问顺序，使得这些频谱切换失败概率最小。

### 3.2 目标信道访问方法

针对这3种信道空闲时间间隔分布模型，本文提出一种共同的目标信道访问机制，即按照平均空闲时间递减的顺序访问信道。这种目标信道访问方法可以得到最小切换失败概率，以下逐一进行证明。需要指出的是，对于空闲时间间隔服从指数分布的情况，采用这种访问机制也能得到最小切换失败概率(见文献[8]中的证明结论)，因此，按信道平均空闲时间递减的顺序对目标信道进行访问这种机制在这4种分布模型下均具有最优性。

(1)均匀分布 均匀分布时，信道  $c_i$  的平均空闲时间为  $b_{c_i}/2$ ，按平均空闲时间递减即为按参数  $b_{c_i}$  递减的顺序对信道进行排序。对于任意信道访问序列  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$ ，对应的切换失败概率为

$$\begin{aligned} f(\mathbf{v}) &= \prod_{i=1}^M \min \left\{ \frac{(i-1)T+T_h}{b_{v_i}}, 1 \right\} \\ &= \prod_{i=1, i \neq l, m}^M \min \left\{ \frac{(i-1)T+T_h}{b_{v_i}}, 1 \right\} \\ &\quad \cdot \left( \min \left\{ \frac{(l-1)T+T_h}{b_{v_l}}, 1 \right\} \min \left\{ \frac{(m-1)T+T_h}{b_{v_m}}, 1 \right\} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

如果  $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_M]$  中存在  $b_{v_l} < b_{v_m}$ ， $l < m$ ，则交换  $v_l$  和  $v_m$  的访问顺序，令所得到的新的访问序列为  $\mathbf{v}_1$ ，其所对应的访问序列的切换失败概率为

$$\begin{aligned} f(\mathbf{v}_1) &= \prod_{i=1, i \neq l, m}^M \min \left\{ \frac{(i-1)T+T_h}{b_{v_i}}, 1 \right\} \\ &\quad \cdot \left( \min \left\{ \frac{(l-1)T+T_h}{b_{v_m}}, 1 \right\} \min \left\{ \frac{(m-1)T+T_h}{b_{v_l}}, 1 \right\} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

所有  $b_{v_l}$  和  $b_{v_m}$  取值情况下， $f(\mathbf{v})$  与  $f(\mathbf{v}_1)$  的比值  $\eta = f(\mathbf{v})/f(\mathbf{v}_1)$  如表2所示。由此可知  $\eta \geq 1$ ，即  $f(\mathbf{v}) \geq f(\mathbf{v}_1)$ 。若新的访问序列中仍然存在非递减排序的两个信道，则继续交换其位置。设总共需要进行  $\xi$  次交换才得到按递减顺序排列的序列  $\mathbf{v}^* = [v_1^*, v_2^*, \dots, v_M^*]$ ，其中  $b_{v_1^*} \geq b_{v_2^*} \geq \dots \geq b_{v_M^*}$ 。将第  $i$  次交换后的序列记为  $\mathbf{v}_i$ ，则有  $f(\mathbf{v}) \geq f(\mathbf{v}_1) \geq f(\mathbf{v}_2) \geq \dots \geq f(\mathbf{v}_{\xi-1}) \geq f(\mathbf{v}^*)$ 。因此在所有可能的信道排序中， $f(\mathbf{v}^*)$  取得最小值，即按照  $\mathbf{v}^*$  中的信道顺序来访问目标信道具有最小切换失败概率。

表2  $\eta$  取值

条件	$\eta$
$b_{v_l} < b_{v_m} < (l-1)T+T_h$ $< (m-1)T+T_h$	1
$b_{v_l} < (l-1)T+T_h < b_{v_m}$ $< (m-1)T+T_h$	$b_{v_m} / ((l-1)T+T_h) > 1$
$b_{v_l} < (l-1)T+T_h < (m-1)T$ $+T_h < b_{v_m}$	$((m-1)T+T_h) / ((l-1)T+T_h) > 1$
$(l-1)T+T_h < b_{v_l} < b_{v_m}$ $< (m-1)T+T_h$	$b_{v_m} / b_{v_l} > 1$
$(l-1)T+T_h < b_{v_l} < (m-1)T$ $+T_h < b_{v_m}$	$((m-1)T+T_h) / b_{v_l} > 1$
$(l-1)T+T_h < (m-1)T+T_h$ $< b_{v_l} < b_{v_m}$	1

(2)Rayleigh 分布 在证明 Rayleigh 分布目标信道访问序列的最小切换失败概率之前，先给出文献[8]中提出的定理。

**定理 1**(文献[8]中 Theorem 2) 对于任意向量  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ ，其中各个  $x_i$  互异，且  $0 < x_i < \infty$ ， $i = 1, 2, \dots, M$ 。  $\{x_i\}_{i=1}^M$  所有  $M!$  种排列对应的  $M!$  个向量组成的集合记为  $\Omega$ ，并令  $x_i$  按递减顺序排列后对应的向量为  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_M]$ 。令

$$f(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^M (1 - e^{-\alpha_i/x_i})$$

其中  $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_M < \infty$ ，则有

$$\mathbf{y} = \arg \min_{\omega \in \Omega} f(\omega)$$

对于 Rayleigh 分布，将定理 1 中的  $x_i$  换成  $2\sigma_{v_i}^2$ ，且将  $\alpha_i$  换成  $((i-1)T+T_h)^2$ ，则可知按参数  $2\sigma_{v_i}^2$  递减排序可以得到最小的切换失败概率。按参数  $2\sigma_{v_i}^2$  递减排序即等价于按均值递减排序。

(3)Weibull 分布 对于 Weibull 分布，本文仅讨论对所有信道  $\alpha$  为某一相同值的情况。将定理 1 中

的  $x_i$  换成  $1/\lambda_{v_i}$ ，且将  $\alpha_i$  换成  $((i-1)T + T_h)^\alpha$ ，则可  
知按参数  $1/\lambda_{v_i}$  递减排序可以得到最小的切换失败  
概率。按参数  $1/\lambda_{v_i}$  递减排序即等价于按均值递减排  
序。

3.3 估计误差的影响

本文采用的目标信道访问方法需要按照信道平  
均空闲时间递减的顺序对目标信道进行访问，因此  
需要事先估计信道平均空闲时间。主用户信道平均  
空闲时间可以根据认知无线电的历史频谱感知结果  
估计得到。通过较长时间的感知，得到多次信道空  
闲时间样本，记为  $\tau_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ， $n$  为观测次数。  
本文以  $\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i$  作为平均空闲时间的估计。则  
其均值和方差分别为

$$E\bar{\tau} = E\tau \tag{6}$$

$$D\bar{\tau} = \frac{1}{n} D\tau \tag{7}$$

其中  $E\tau$  和  $D\tau$  分别为特定分布下的信道空闲时间  
的数学期望和方差，如表 1 中所示。当信道平均空  
闲时间真值为  $t$  时，各种分布下估计方差分别为

$$D\bar{\tau} = \begin{cases} t^2/(3n), & \text{均匀分布} \\ (4 - \pi)t^2/(\pi n), & \text{Rayleigh分布} \\ \left( \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha} + 1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)\right)^2}{\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)} \right) \frac{t^2}{n}, & \text{Weibull分布} \\ t^2/n, & \text{指数分布} \end{cases} \tag{8}$$

图 2 给出各种分布下的估计方差，其中  $n = 10$ ，  
Weibull 分布下假设  $\alpha = 1.5$ 。由图可知，这 4 种分  
布下，信道空闲时间数学期望相同时，Rayleigh 分  
布的估计方差最小，而指数分布的估计方差最大。  
按照估计所得平均空闲时间对信道进行排序，可能  
与按空闲时间数学期望真值进行排序结果不同，从  
而导致切换失败概率的提高。

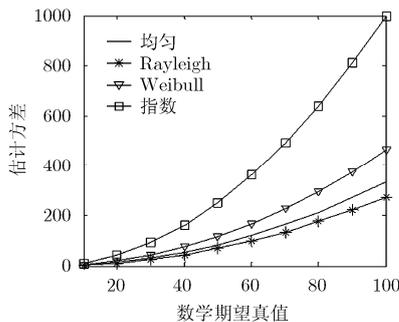


图 2 信道平均空闲时间估计方差

4 仿真分析

仿真中假设  $T = 30$ ， $T_h = 5$ ，目标信道个数为  
8，各个信道的平均空闲时间分别为 10, 300, 210, 77,  
52, 5, 130, 59。假设可以准确估计信道平均空闲时  
间。表 3 中给出了本文所提目标信道访问方法以及随  
机访问方法所得的频谱切换失败概率，其中随机选  
择方法的失败概率是 100000 次仿真结果的平均。从  
表中可以看出，相比与随机选择，本文所提的目标  
信道访问方式能大幅度降低频谱切换概率。相比于  
最差信道访问方式，本文所提方法优越性更为明  
显。

表 3 频谱切换失败概率

分布	本文(最优)	随机	最差
均匀	$1.07 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-3}$	$1.92 \times 10^{-2}$
Rayleigh	$5.68 \times 10^{-7}$	$3.92 \times 10^{-4}$	$2.98 \times 10^{-2}$
Weibull	$1.73 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-3}$	$3.82 \times 10^{-2}$
指数	$5.91 \times 10^{-4}$	$5.88 \times 10^{-3}$	$5.86 \times 10^{-2}$

为衡量估计误差对性能的影响，图 3 给出了不同  
 $n$  值下的切换失败概率，仿真参数为： $T = 30$ ，  
 $T_h = 5$ ，目标信道个数为 8，各个信道的平均空闲时  
间分别为 40, 250, 210, 77, 52, 5, 130, 59。图 3 给出  
了  $n$  取值从 1 到 20 时的切换失败概率。由图可知，  
由于对信道平均空闲时间的估计存在误差，所得到的  
切换失败概率要大于不存在估计误差的理想最小切  
换失败概率。但是随着  $n$  的增大，估计方差变小，  
当  $n = 20$  时，与理想最小切换失败概率非常接近。

5 结束语

频谱切换是认知无线电的一项关键技术。本文  
针对先应式决策频谱切换，提出了一种目标信道访  
问机制，证明了在主用户信道空闲时间服从均匀分  
布、Rayleigh 分布或 Weibull 分布时(还包括指数分  
布)，这种机制能够得到最小频谱切换失败概率。仿  
真结果验证了该方法相对于随机信道访问的优越  
性。本文还考虑了信道平均空闲时间估计的影响。  
结果表明，在能够获得数十次(如 20 次)信道空闲时  
间样本的情况下，所得到的切换失败概率与理想切  
换失败概率非常接近，说明了这种机制受信道平均  
空闲时间估计误差的影响较小。后续研究可以考虑  
更多的分布类型，如 Rician 分布、Gamma 分布等，  
研究本文所提目标信道访问机制在这些分布下的性  
能。

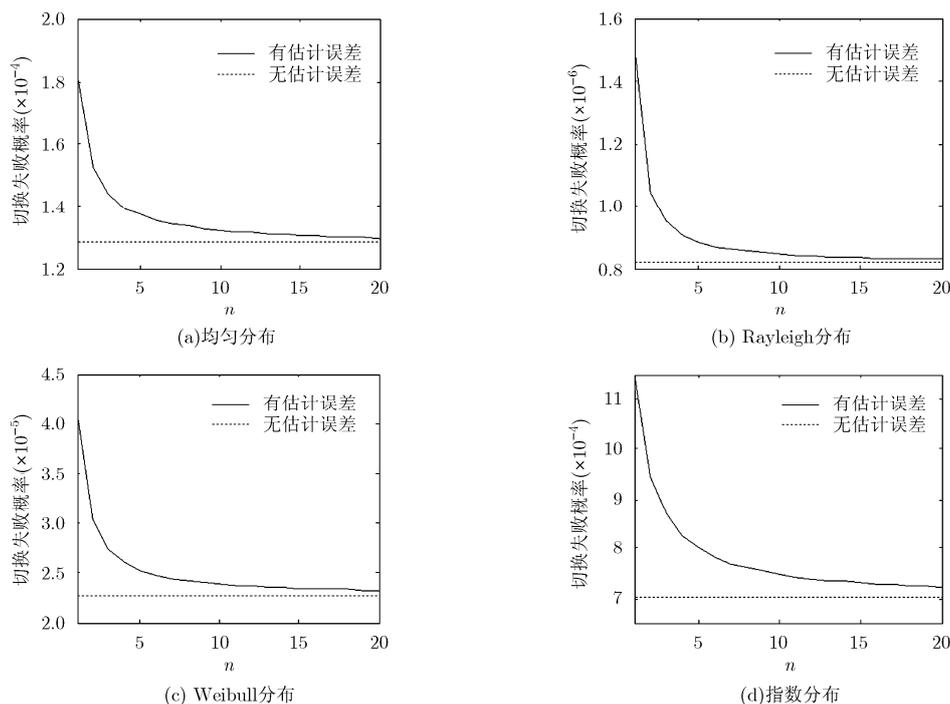


图3 存在估计误差下的切换失败概率

## 参考文献

- [1] Haykin S. Cognitive radio: brain-powered wireless communications [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
  - [2] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
  - [3] Song Y and Xie J. Performance analysis of spectrum handoff for cognitive radio ad hoc networks without common control channel under homogeneous primary traffic[C]. The 30th IEEE International Conference on Computer Communications, Shanghai, China, April 2011: 3011-3019.
  - [4] Song Y and Xie J. ProSpect: a proactive spectrum handoff framework for cognitive radio Ad hoc networks without common control channel[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(7): 1127-1139.
  - [5] Wang L C and Wang C W. Spectrum handoff for cognitive radio networks: reactive-sensing or proactive-sensing[C]. IEEE International Performance Computing and Communications Conference, Texas, USA, December 2008: 343-348.
  - [6] Wang C W and Wang L C. Modeling and analysis for proactive decision spectrum handoff in cognitive radio networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Dresden, Germany, June 2009: 1-6.
  - [7] Wang C W, Wang L C, and Adachi F. Modeling and analysis for reactive-decision spectrum handoff in cognitive radio networks[C]. IEEE Global Telecommunications Conference, Florida, USA, December 2010: 1-6.
  - [8] Zheng S, Yang X, Chen S, et al. Target channel sequence selection scheme for proactive-decision spectrum handoff[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(12): 1332-1334.
  - [9] Pawelczak P, Pollin S, So H S W, et al. State of the art in opportunistic spectrum access medium access control design [C]. Third International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Singapore, Singapore, May 2008: 1-6.
- 郑仕链：男，1984年生，博士生，研究方向为认知无线电、进化算法、压缩感知。
- 杨小牛：男，1961年生，研究员，博士生导师，研究方向为软件无线电、认知无线电、通信信号处理。